



УДК 621.355

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В НАКОПИТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE USE OF SUPERCAPACITORS AS ENERGY STORAGE DEVICES

Радченко Руслан Васильевич, старший преподаватель каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. E-mail: rurad@mail.ru. Тел.: +79193968850

Тюльпа Валентина Владимировна, канд. техн. наук, доцент каф. «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. E-mail: tvalvl@list.ru. Тел.: +79122451931

Ruslan V. Radchenko, Senior Lect., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: rurad@mail.ru. Тел.: +79193968850

Valentina V. Tyulpa, Cand. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: tvalvl@list.ru. Ph.: +79122451931

Аннотация. В статье приводятся преимущества суперконденсаторов перед аккумуляторами и определяются эксергетические КПД различных процессов суперконденсатора.

Abstract. The article presents the advantages of supercapacitors in front of the battery and determined the exergy efficiency of various processes of the supercapacitor.

Ключевые слова: накопитель; эксергия; процесс заряда; процесс разряда; процесс хранения заряда

Keywords: energy storage; exergy; the charge process; the discharge process; the process of storing charge

Современная техника всё шире использует в качестве перезаряжаемых источников тока энергонакопительные электрические конденсаторы (суперконденсаторы или ионисторы), имеющие ряд преимуществ перед аккумуляторами [1–3]:

- они могут эксплуатироваться в широком интервале температур (от - 60 до +125°C и выше) без обслуживания и замены в течение всего срока службы (до 20 лет и более);
- имеют большое количество циклов в режиме «заряд-разряд» ($> 10^6$ циклов) без заметного ухудшения параметров;
- имеют высокую удельную мощность (десятки кВт/кг) и, благодаря небольшой постоянной времени RC, заряжаются и разряжаются очень быстро (практически мгновенно).

Если обычный конденсатор представляет собой обкладки из фольги, разделенные диэлектриком, то ионистор – это комбинация конденсатора с электрохимической батареей – электрохимический конденсатор (ЭХК). В нем применяются специальные материалы для обкладок и электролит. В качестве обкладок используются материалы

одного из трех типов: обкладки большой площади на основе активированного угля, оксиды металлов и проводящие полимеры.

Использование высокопористых угольных материалов позволяет достичь плотности емкости порядка 10 Ф/см³ и больше. Ионисторы на базе активированного угля наиболее экономичны в изготовлении. Их еще называют двухслойными или ДЭС - конденсаторами, потому что заряд сохраняется в двойном слое, образующемся на поверхности обкладки.

Схема замещения суперконденсатора практически совпадает со схемой обычного конденсатора [1].

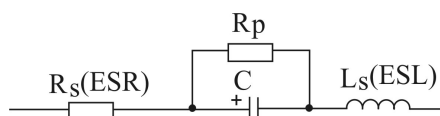


Рис.1. Схема замещения суперконденсатора: L_S – индуктивность потерь, R_p – сопротивление утечки, C – собственно емкость ЭХК, R_S – общее активное

сопротивление (сопротивление потерь).

Общее сопротивление потерь R_s обычно разбивают на две составляющих:

$$R_s = ESR + EDR,$$

где ESR – сопротивление потерь, как у обычных конденсаторов, EDR – эквивалентное распределенное сопротивление, определяемое ионными токами в двойном электрическом слое.

Сопротивление утечки R_p связано со структурой ДЭС и зависит от типа конденсатора.

ПРОЦЕСС ЗАРЯДА НАКОПИТЕЛЯ

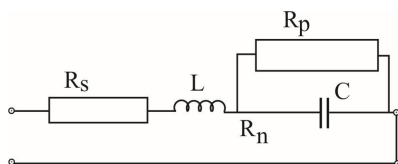


Рис. 2. Схема заряда накопителя

В процессе заряда потери энтропии при изобарно-изотермическом процессе в единицу времени

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{dS_{\text{зар}}}{dt} = \frac{U_c I}{T} = \frac{U_c}{T} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{T} \frac{d}{dt} \left(\frac{CU_c^2}{2} \right) \quad (1)$$

Здесь U_c – рабочее напряжение конденсатора, $\frac{dq}{dt}$ – количество передаваемого в единицу времени заряда, C – ёмкость конденсатора, T – температура окружающей среды.

Если ёмкость суперконденсатора C , а время заряда $t_{\text{зар}}$, напряжение на конденсаторе в момент времени t

$$U_c = U_{c0} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_s C}} \right) \quad (2)$$

Здесь R_s – сопротивление потерь в цепи, U_{c0} – номинальное напряжение заряда суперконденсатора.

Изменение энтропии в процессе заряда

$$\Delta S_{\text{зар}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{зар}}} \frac{d}{dt} \left(\frac{CU_c^2}{2} \right) dt = \frac{1}{T} \frac{CU_{c0}^2}{2} \times \int_0^{t_{\text{зар}}} \frac{d}{dt} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_s C}} \right)^2 dt. \quad (3)$$

или

$$\Delta S_{\text{зар}} = \frac{1}{T} \frac{CU_{c0}^2}{2} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_s C}} \right)^2. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (7) [5], получим эксергетический КПД процесса заряда суперконденсатора

$$\eta_{EX}^{\text{зар}} = e^{-\frac{t_{\text{зар}}}{R_s C}} \left(2 - e^{-\frac{t_{\text{зар}}}{R_s C}} \right) \quad (5)$$

ПРОЦЕСС ХРАНЕНИЯ ЗАРЯДА

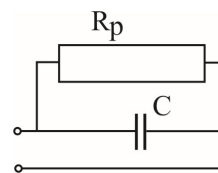


Рис. 3. Схема хранения заряда

Потери эксергии в конденсаторе при хранении в случае изобарно-изотермического процесса происходят в виде тепловых потерь, т.е. $\Delta S_{\text{xp}} \leq 0$ и выделяющееся тепло необходимо отводить. Изменение энтропии в процессе хранения заряда

$$\frac{dS_{\text{xp}}}{dt} = \frac{U_c I}{T} = \frac{U_c}{T} \frac{dq}{dt} = \frac{1}{T} \frac{d}{dt} \left(\frac{CU_c^2}{2} \right) \quad (6)$$

Потери энтропии в суперконденсаторе

$$\Delta S_{\text{xp}} = \frac{1}{T} \cdot EX_{\text{п}}^{\text{xp}} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{\text{xp}}} \frac{d}{dt} \left(\frac{CU_c^2}{2} \right) dt \quad (7)$$

Учитывая, что

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} e^{-\frac{t}{R_s C}} = U_{c0} e^{-\frac{t}{R_s C}},$$

получим

$$\Delta S_{\text{xp}} = \frac{1}{T} \frac{CU_{c0}^2}{2} \left(e^{-\frac{2t_{\text{xp}}}{R_p C}} - 1 \right) \quad (8)$$

Эксергетический КПД накопителя в процессе хранения

$$\eta_{EX}^{\text{xp}} = 1 + \left(e^{-\frac{2t_{\text{xp}}}{R_p C}} - 1 \right) = e^{-\frac{2t_{\text{xp}}}{R_p C}}. \quad (9)$$

ПРОЦЕСС РАЗРЯДА НАКОПИТЕЛЯ

В результате необратимых потерь, связанных с процессом хранения, полезная энергия, которая может быть использована потребителем, равна $\int_0^{t_{\text{xp}}} EX(t)_{\text{xp}} dt$.

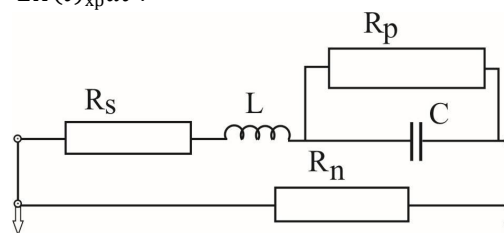


Рис. 4. Схема разряда накопителя в нагрузку

$$\int_0^{t_{\text{xp}}} EX(t)_{\text{xp}} dt = \int_0^{t_{\text{зар}}} EX(t)_{\text{зар}} dt - T \Delta S_{\text{xp}} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \int_0^{t_{зар}} \frac{d}{dt} \left(\frac{CU_c^2}{2} \right) dt - \Delta S_{xp} = \\
 &= \frac{CU_{c0}}{2} \left\{ \int_0^{t_{зар}} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_S C}} \right)^2 dt - \left(e^{-\frac{2t_{xp}}{R_p C}} - 1 \right) \right\} \\
 &= \frac{CU_{c0}}{2} \left\{ \left(1 - e^{-\frac{t_{зар}}{R_S C}} \right)^2 - \left(e^{-\frac{2t_{xp}}{R_p C}} - 1 \right) \right\}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Изменение энтропии такой системы складывается из внутренних изменений энтропии $d_i S$ и ее оттоком из системы $d_e S$ из-за теплообмена с окружающей средой.

$$\Delta S_{раз}^i = \frac{1}{T} \int_0^{t_{раз}} \frac{d}{dt} \left(\frac{CU_c^2}{2} \right) dt = \frac{1}{T} \frac{CU_{c0}^2}{2} \int_0^{t_{раз}} \frac{d}{dt} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{R_S C}} \right)^2 dt \quad (11)$$

или

$$\Delta S_{раз}^i = \frac{1}{T} \frac{CU_{c0}^2}{2} \left(1 - e^{-\frac{t_{раз}}{R_S C}} \right)^2. \quad (12)$$

Внешние потери EX_{II}^e , связанные с условиями взаимодействия системы с окружающей средой

$$\Delta S_{раз}^e = \frac{1}{T} \int_0^{t_{раз}} \frac{d_e S_{раз}}{dt} dt = \frac{1}{T} \frac{CU_{c0}^2}{2} \left(e^{-\frac{2t_{раз}}{R_{нар} C}} - 1 \right). \quad (13)$$

$$\eta_{EX}^{раз} = 1 - \frac{\left(e^{-\frac{2t_{раз}}{R_{нар} C}} - 1 \right) + \left(1 - e^{-\frac{t_{раз}}{R_S C}} \right)^2}{\left\{ \left(1 - e^{-\frac{t_{зар}}{R_S C}} \right)^2 - \left(e^{-\frac{2t_{xp}}{R_p C}} - 1 \right) \right\}} \quad (14)$$

Полный эксергетический КПД накопителя (1) с использованием соотношений (5, 9, 14) может быть записан как

$$\begin{aligned}
 \eta_{EX} &= e^{-\frac{t_{зар}}{R_S C}} \cdot \left(2 - e^{-\frac{t_{зар}}{R_S C}} \right) \cdot e^{-\frac{2t_{xp}}{R_p C}} \times \\
 &\times \left\{ 1 - \frac{\left(e^{-\frac{2t_{раз}}{R_{нар} C}} - 1 \right) + \left(1 - e^{-\frac{t_{раз}}{R_S C}} \right)^2}{\left\{ \left(1 - e^{-\frac{t_{зар}}{R_S C}} \right)^2 - \left(e^{-\frac{2t_{xp}}{R_p C}} - 1 \right) \right\}} \right\} \quad (15)
 \end{aligned}$$

Эксергетический КПД процесса заряда суперконденсатора (5) определяется временем его заряда $t_{зар}$ и внутренним сопротивлением R_S . Значения этих величин для мощных суперконденсаторов лежат в пределах: $t_{зар}$ десятков секунд, $R_S \sim \text{мОм}$ [2, 3]. Поэтому можно считать, что $\eta_{EX}^{зар} \approx 1$.

Эксергетический КПД процесса хранения заряда суперконденсатора (9) определяется временем хранения заряда t_{xp} и сопротивлением утечки R_p . Среднее время разряда конденсаторов ёмкостью 450 фарад из-за утечки до уровня 80% составляет 30-45 дней [14]. Поэтому $\frac{q_{ут}}{q} \approx 0,2 = 1 - e^{-\frac{t_{xp}}{R_p C}}$, откуда при $t_{xp} = 2,6 \cdot 10^6 \text{ с}$, $R_p = 27 \text{ кОм}$.

Время разряда $t_{раз}$ можно оценить из соотношения

$$t_{раз} = CR_{нар} \ln \frac{U_c}{U_{c0}} \quad (16)$$

При разряде суперконденсатора до 50% номинального напряжения выделяется до 75% энергии, накопленной в суперконденсаторе $E = \frac{1}{2} C \cdot U_{max}^2 - \frac{1}{2} C \cdot U_{min}^2$. Можно принять $t_{раз} = R_{нар} C \cdot \ln 2$.

Эксергетический КПД процесса разряда суперконденсатора (14) задаётся требуемыми параметрами нагрузки $R_{нар}$, временем использования энергии накопителя $t_{раз}$, временем заряда и временем хранения энергии t_{xp} .

Полный КПД накопителя, как показывают оценки выражения (15), зависит в наибольшей степени от времени хранения энергии в конденсаторе. Для разработанных до настоящего времени моделей суперконденсаторов условие высокого КПД ($t_{xp} \leq R_p C$) достижимо только для сравнительно коротких сроков хранения энергии и зависит от величины сопротивления утечки R_p .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Деньщиков К.К. Суперконденсаторы: принципы их применения. www.iel.wroc.pl/files/default/dphki8408o5si4/denszczi_kov.pdf.
2. Nesscap Co., Ltd., NESSCAP Tech Guide_2008.pdf.
3. А. Колпаков. Ультраконденсаторы Maxwell Technologies. Компоненты и технологии, №1, 2004.
4. Гулия Н.В. Накопители энергии. М: Наука, 1980.
5. Радченко Р.В., Тюльпа В.В. Эксергетический и термодинамический методы сравнения накопителей энергии. Материалы научно-практической конференции: Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров – Екатеринбург: УрФУ, 2016; с. 175-179.